ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202106.00099v1

吉林 280mm 全天区可转动光电阵测光精度评估研究*

牛炳力 [1,2]，刘承志 [1]，李振伟 [1]，康 喆 [1]

（1. 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站，吉林 长春 130117；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：位于吉林天文观测基地的 280mm 全天区可转动光电阵是一台用于空间碎片巡天观测的设备，为了研究该设备光度测量性能，评估其测光精度，选择 M67 疏散星团这一测光定标区中的测光标准星进行观测。首先，在 IRAF 中对观测图像进行预处理，之后进行较差测光。接着，提取测光数据并将整晚观测数据进行最小二乘直线拟合，拟合结果给出了主消光系数及相应的系统转换系数，并得到仪器星等至标准星等的转换公式。最后，利用计算得到的均方根误差对该设备的测光精度进行大致的评估。计算结果表明在标准测光夜测量亮度亮于 13.8 等的星时，280mm 全天区可转动光电阵的测光精度可达 0.13 星等。同时将观测图像与 UCAC2 星表匹对识别，利用背景恒星中的 UCAC2 标准星做外符精度的校验，结果与前者基本相同。本设备的测光精度基本满足空间碎片巡天观测的要求。

关键词：测光精度；巡天观测；标准星；转换公式；UCAC2 星表

中图分类号：P111.2; P141.2 **文献标识码：**A **文章编号：**

1. 引言

吉林 280mm 全天区可转动光电阵属于中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站，坐落于吉林省吉林市天文观测基地。针对一台观测设备在同一时间只能对单一目标进行跟踪观测的模式非常限制对空间目标的编目能力，于是大视场、多目标的光电望远镜阵列观测模式应运而生。目前国际上大天区巡天观测设备越来越多，通过光学巡天观测不仅可以提高观测效率还可以获得更多的空间目标参数，因此这类设备的应用价值极大[1]。该光电阵由四台 280mm 透射式光学望远镜及两台 T 型架结构赤道仪组成，通过实际检测得到该设备的指向精度在赤经和赤纬两个方向上各优于 9″，在跟踪测量精度方面赤经方向上的平均误差为 0.9″，赤纬方向上的平均误差为 1″。每台望远镜有效通光口径为 280mm±2mm 并装备有科学级 CMOS 相机，像素为 4096×4096，像元尺寸为 9μm×9μm，量子效率不小于 70%。四台望远镜的各项设计参数相同，在测光性能方面与单台望远镜基本一致，不同之处在于观测的天区范围得到极大提升。虽然在装调上存在难以避免的机械误差，但是通过同一终端进行控制，可以保证望远镜之间的协调一致。本设备的观测视场可覆盖 160 平方度的天区，在 19 等天光观测条件下可探测到亮于 16.5 星等的目标。

随着空间碎片的日益增加，在轨航天器的安全运行受到严重威胁，因此需要通过观测获取空间碎片的位置及轨道信息[2]，从而进行碎片碰撞预警、航天器有效规避以及碎片编目等工作。中高轨空间碎片的光学观测在目标探测、目标跟踪、目标识别等领域具有广阔的前景，

---

* **基金项目：**国家自然科学基金天文联合基金（U2031129），中国科学院天文大科学中心前瞻课题（Y9290201），中国科学院青年创新促进会（2018）资助

收稿日期： 年 月 日；修订日期： 年 月 日；

作者简介：牛炳力，男，博士研究生，研究方向：空间目标多色测光. Email: niubl@cho.ac.cn

利用地基望远镜对空间碎片进行较长弧段的连续测光观测，可以获取目标空间碎片的光度变化和位置变化特征，进而对它的形状、尺寸及运行姿态等进行研究[3]。本设备实现了可动盲扫式观测，降低了观测人员的劳动量，可对大批量空间目标进行捕获，提升了空间目标的编目定轨能力。280mm 全天区可转动光电阵的主要功能是空间碎片的巡天观测，设计谱线为 650nm，在 500nm-800nm 复消色差，为了确保该设备探测空间暗弱目标的能力，并未安装滤光片。因此对该设备在可见光波段进行测光精度评估是很有意义的。本文选取 M67 疏散星团作为测光定标区，通过对星团中的测光标准星进行观测来测定主消光系数，并研究和确定仪器星等系统与标准星等系统之间的转换关系，将观测得到的仪器星等归算到大气外标准系统下的仪器星等并与标准星等做对比，计算均方根误差进而对本设备的测光精度进行评估。

2. 观测及数据处理

280mm 光电阵目前采用的观测模式为短曝光巡天观测模式，即根据预报指向特定的天区进行拍摄，且观测对象大多集中于中高轨及地球同步轨道的空间目标，因此本设备观测空间目标与观测恒星时的各项参数基本相同。通常地基望远镜测光系统的性能研究都是选用 Landolt 标准星作为观测对象，而对于几十厘米口径望远镜来说，由于视场较大且视场中背景恒星众多，因此并不适用于观测单一目标恒星，同时空间碎片的位置及运动姿态不断变化，其光度信息时刻在改变，不能作为标定测光精度的观测对象。基于上述特性本文选取疏散星团作为观测对象，梅西耶 67（也称为 M67 或 NGC2682，后文均用 M67 代称）是位于巨蟹座的一个疏散星团，大约有 500 颗成员，星场并不密集且亮度集中在 10-11 等，是理想的测光定标区。我们的测光工作就在这个星团中进行，所采用的测光标准星表由美国变星观测者协会（AAVSO）提供[1]，选取其中的 10 颗标准星进行测光，如表 1 所示，同时该网站也提供 M67 疏散星团中变星的查询，这里不再赘述。

在 2020 年 12 月 6 日、12 月 7 日、12 月 8 日这三日分别对选取的标准星进行整夜观测，这几个观测夜的天气都较稳定。从 M67 由中天下落至地平高度 60° 时开始拍摄，此时月光对测光几乎无影响，每隔 0.1 大气质量拍摄 10 张图像，每张图像的曝光时长为 2s，直至 M67 星团降落至地平高度 30° 左右时停止拍摄。根据平大气模型理论[4]，当天顶距 $z<75°$ 时，大气质量 $M(z)\approx\sec(z)$，整个拍摄过程大气质量数从 1.1 到 2，变化比较明显。

表 1 观测 M67 疏散星团测光标准星

Table 1 The observed M67 open cluster standard stars

AUID	RA(J2000)	Dec(J2000)	B/mag	V/mag	B-V
000-BLG-886	08:51:17.12	+11:48:16.4	11.553	10.289	1.264
000-BLG-889	08:51:12.71	+11:52:42.6	11.617	10.524	1.093
000-BLG-891	08:51:43.58	+11:44:26.7	11.898	10.763	1.135

[1] https://www.aavso.org

chinaXiv:202106.00099v1

000-BLG-892	08:51:27.04	+11:51:52.8	11.042	10.946	0.096
000-BLG-895	08:51:26.46	+11:43:51.0	11.391	11.263	0.128
000-BLG-896	08:51:42.39	+11:51:23.3	12.342	11.266	1.076
000-BLG-902	08:51:42.37	+11:50:07.9	12.686	11.636	1.050
000-BLG-904	08:51:39.41	+11:51:45.9	13.138	12.138	1.000
000-BLG-924	08:51:41.97	+11:43:37.5	13.278	12.708	0.570
000-BLG-940	08:51:30.16	+11:43:50.2	13.714	13.133	0.581

获取观测数据之后，在 IRAF 中对观测图像进行本底约化、暗流改正、平场修正，对预处理之后的图像进行较差测光[5]获取不同大气质量下测光标准星的仪器星等，再结合表 1 中的标准星等测定主消光系数及系统转换系数。

2.1 主消光系数的确定

在地平高度较高时，可将大气层看作为理想平大气，在这一假设条件下天体的消光星等与消光路程成正比，由此可推导出大气消光公式[6]:

$$m_z - m_0 = kM(z) \tag{1}$$

式中 m_z 为在大气内观测天顶距为 Z 的天体的视星等，m_0 为天体在大气外的视星等，k 为大气消光系数，M(z)为天顶距为 z 方向上的大气质量。大气消光与色指数有关，因此，消光系数 k 通常应包括两项：一项是与波长无关的主消光系数 k′，另一项是与色指数 C 有关的二次消光系数 k″。即：

$$k = k' + Ck'' \tag{2}$$

由于 280mm 全天区可转动光电阵的望远镜并未加装滤光片，而且 k″ 比 k′ 小得多通常可以忽略不计[7]，因此只考虑大气对天体亮度直接消光的主消光系数。即大气消光公式可简化为：

$$m_z - m_0 = k'M(z) \tag{3}$$

以星等差Δm=mz-m0 为纵坐标，大气质量 M(z)为横坐标，为了提高拟合精度，利用最小二乘法对整夜测光数据进行拟合，图 1 给出 2020 年 12 月 6 日-8 日的数据拟合图，并同时确定出大气消光系数 K’，也就是拟合直线的斜率，结果列于表 2。

chinaXiv:202106.00099v1

chinaXiv:202106.00099v1

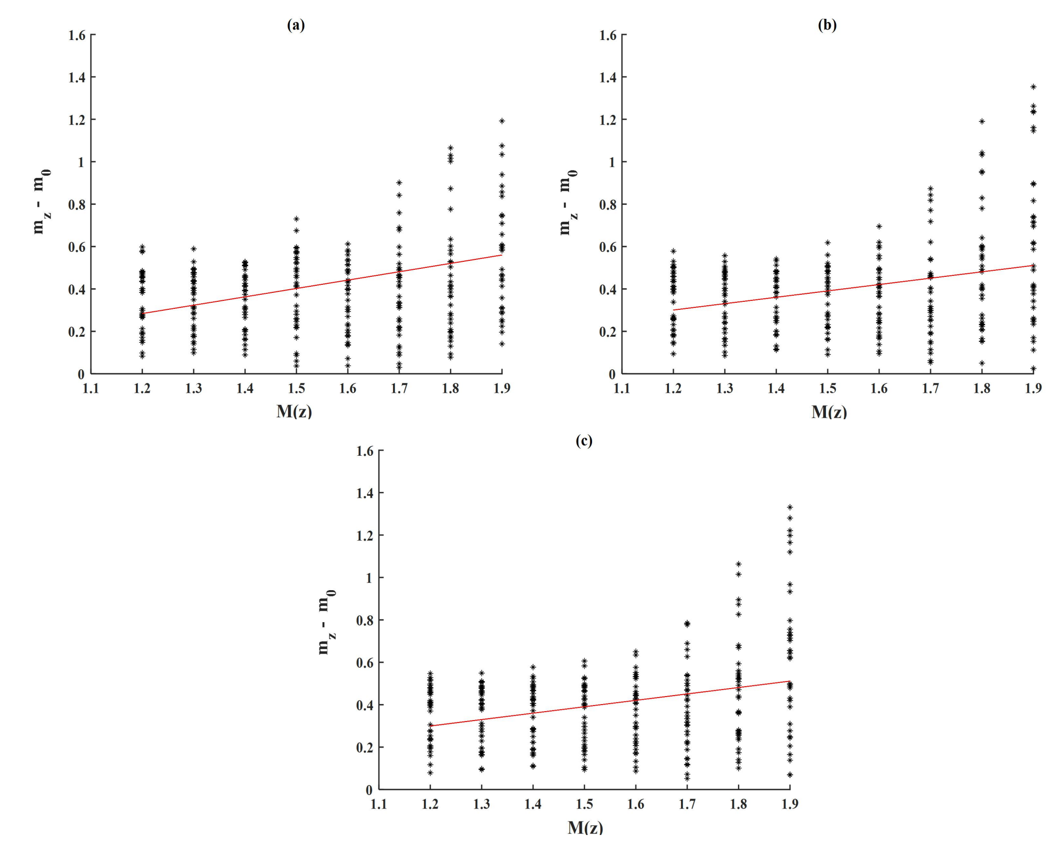


图 1　2020-12-06, 12-07, 12-08 主消光系数（(a):12-06 k' (b):12-07 k' (c):12-08 k'）

Fig.1　The extinction coefficients of Dec 6，Dec 7，Dec 8，2020 ((a)：Dec 6 k' (b)：Dec 7 k' (c)：Dec 8 k')

表 2　主消光系数

Table 2　The values of the main extinction coefficients k'

2020-12-06			2020-12-07			2020-12-08		
主消光系数	误差	线性相关系数	主消光系数	误差	线性相关系数	主消光系数	误差	线性相关系数
0.4021	0.091	0.9927	0.3327	0.088	0.9971	0.3375	0.089	0.9914

2.2 系统转换系数的测定

通过观测得到的仪器星等在进行大气消光改正后转化为大气外仪器星等，为使该结果与标准星等具有可比性，还需做标准星等系统的转换[8]。由于未加装滤光片，因此仅考虑观测星等到标准系统星等的转换，这里我们采取如下的星等转换方程：

$$V = v_0 + \varepsilon(B - V) + \xi \tag{4}$$

式中 V 是标准星等，v0 是大气外仪器星等，ε 为系统转换系数，(B-V)为标准系统下色指数，ξ 为常数项。类似于确定主消光系数的方法，利用最小二乘法拟合确定转换系数 ε 和 ξ，结果列于表 3。

对仪器星等进行大气消光改正和系统转换后得到星等转换综合公式：

$$V = v - 0.3574M(z) + 0.4322(B - V) - 0.1666 \tag{5}$$

表 3 系统转换系数

Table 3 The instrument-related transformation coefficients

2020-12-06		2020-12-07		2020-12-08		平均转换系数		RMS
ε	0.4546	ε	0.4309	ε	0.4112	ε	0.4322	0.0217
ξ	-0.1201	ξ	-0.2026	ξ	-0.1773	ξ	-0.1666	0.0423
转换标准误差	0.101	转换标准误差	0.102	转换标准误差	0.107			

3. 测光精度分析

将 M67 疏散星团中观测目标的仪器星等进行大气消光改正和系统转化，然后再与相应的标准星等 V 做差，根据公式 $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_i - V)^2}$ 计算均方根误差来评估测光精度，结果如表 4 所示。

图 3（a）（b）（c）分别显示了 2020 年 12 月 6 日、7 日、8 日三天数据中 M67 观测目标观测值转换后星等与标准星等的对比，对角线斜率分别 1.026、1.031、1.051 说明转换后星等与标准星等比较接近，在标准测光夜测量亮度亮于 13.8 等的星时，测光精度可达 0.13 星等。测光精度的大小受多方面因素的影响，例如城市光污染。对于 280mm 望远镜来说，测光精度主要与未加装滤光片有关，这导致观测标准星获取的仪器星等并不完全是 V 波段的星等，这是主要误差所在。

由于 280mm 望远镜用于空间目标的巡天观测，视场中出现的背景恒星具有随机性，因此选取背景恒星进行外符精度评估是很有参考价值的。在这项工作中我们用到 UCAC2 星表，UCAC2 是由美国海军天文台出版的一份高密度、高精度的天体测量星表，它囊括了 48,330,571 颗恒星，覆盖天区较广，在一些区域甚至达到+52 度，星表中所有恒星都能提供自行和光度测定，位置在历元 J2000.0 中给出[9]。用户可以通过 UCAC2 星表提供的 FORTRAN 语言和 C 语言的访问接口进行调用查询。

2020 年 12 月 10 日利用 280mm 望远镜对 M67 疏散星团附近天区进行巡天观测，将观测图像与 UCAC2 星表进行匹对，识别图像中的 UCAC2 标准星，并选取亮度范围在 9.76 星等到 14.79 星等的一批 UCAC 标准星进行测光精度评估，如表 5 所示。利用式(5)将观测得到的仪器星等进行转换，然后与星表中的标准星等进行比较[10]并计算均方根误差，结果如图 2（d）所示对角线斜率为 1.081，RMSE 见表 4。

chinaXiv:202106.00099v1

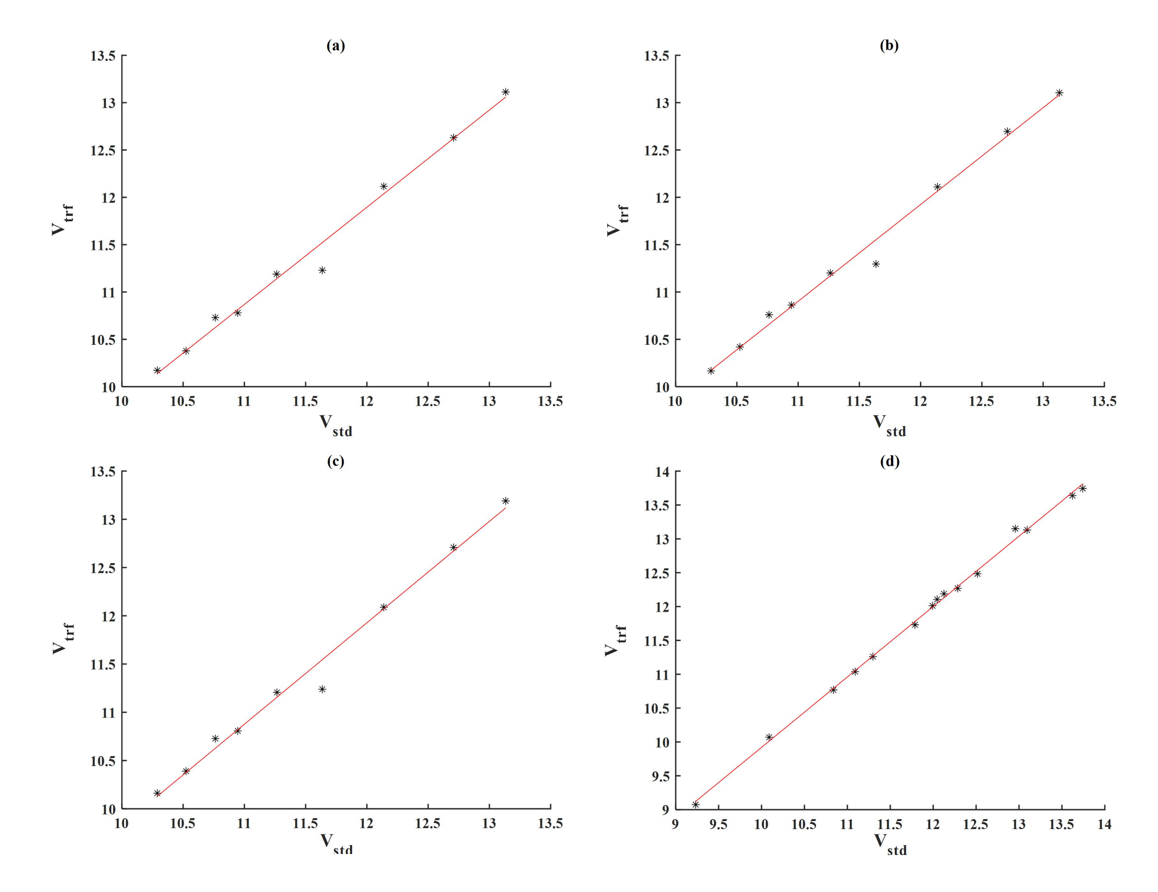


图 2　标准星等（V_{std}）与转换后星等（V_{trf}）的比较（(a)（b）(c) 分别为 M67 成员星在 2020-12-06、12-07、12-08 三天的星等对比图；(d) UCAC2 星表成员的星等对比图）

Fig.2　Relations between transformed magnitudes (V_{trf}) and standard magnitudes (V_{std}) ((a):M67 for Dec 6(b):M67 for Dec 7(c):M67 for Dec 8(d):UCAC2)

表 4 转换后星等与标准星等的均方根误差

Table 4　RMSE of transformed magnitude and standard magnitude

2020-12-06		2020-12-07		2020-12-08		2020-12-10	
观测对象	M67 测光标准星	观测对象	M67 测光标准星	观测对象	M67 测光标准星	观测对象	UCAC2 测光标准星
RMSE	0. 123	RMSE	0. 136	RMSE	0. 137	RMSE	0. 141

上述计算结果表明，目标恒星的仪器星等在经过转换后与标准星等的线性相关系数接近于 1，在标准测光夜下观测亮于 14.8 等星时，测光精度可达到 0.14 星等，与观测 M67 疏散团标准星的测光精度大致相同。

表 5 2020 年 12 月 10 日观测的 UCAC2 标准星

Table 5　The observed UCAC2 standard stars in December 10, 2020

Star ID	RA(J2000)	Dec(J2000)	B	V	B-V
33927639	8:54:45.40	+6:19:41.26	13.196	12.046	1.15
33927630	8:54:41.08	+6:23:21.39	14.182	13.623	0.559
33927652	8:54:54.12	+6:26:17.49	12.703	12.286	0.417

chinaXiv:202106.00099v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202106.00099v1

35022955	8:43:36.30	+9:13:00.86	13.267	11.993	1.274
35022948	8:43:31.72	+9:15:33.50	13.744	13.095	0.649
35022970	8:43:51.78	+9:22:26.53	11.372	10.838	0.534
35393641	9:03:21.99	+10:18:06.71	9.776	9.233	0.543
35393564	9:02:04.55	+10:20:50.10	11.918	11.298	0.62
35393643	9:03:27.69	+10:24:04.27	11.749	11.091	0.658
35393663	9:03:50.75	+10:25:39.38	13.077	11.788	1.289
35932643	8:59:43.98	+11:35:03.83	10.580	10.089	0.491
35932553	8:58:26.62	+11:36:03.13	12.761	12.126	0.635
35932623	8:59:28.46	+11:40:43.80	13.550	12.517	1.033
35932583	8:58:49.42	+11:50:30.50	14.609	12.957	1.652
35932500	8:57:45.94	+11:58:47.25	14.792	13.743	1.049

4. 结语

本文对 280mm 全天区可转动光电阵的测光精度进行科学评估，结果表明在标准测光夜测量亮度亮于 13.8 等的星时，测光精度可达 0.13 星等，该结果比较理想。望远镜未加滤光片，这是因为该设备多用于空间碎片的巡天观测，加装滤光片会影响空间暗弱目标的获取，在不配备滤光片的情况下可以充分发挥光电阵的探测能力。该设备的优势在于利用大视场开展空间碎片的监测工作，上述精度评估结果满足空间碎片巡天观测的精度要求。同时本文将巡天观测图像与 UCAC2 星表匹对，选取图像中的 UCAC2 成员星做外符精度校验，结果表明在标准测光夜下观测亮于 14.8 等星时，测光精度可达到 0.14 星等，说明 280mm 全天区可转动光电阵的测光系统具有较好的稳定性与可靠性。

在完成测光精度评估的同时，还测定了吉林观测基地的主消光系数，然而对于观测台站消光系数的测量是个长期的过程，因此主消光系数的测量结果是比较粗糙的。接下来我们会改进观测方法，利用吉林观测基地其它设备在更好的测光夜对标准星进行测光，从而测定更精准的大气消光系数。

参考文献：

[1] 袁海龙，张彦霞，张昊彤，等.恒星大气参数测量[J].天文研究与技术，2018，15(3)：257-265.
Yuan Hailong, Zhang Yanxia, Zhang Haotong,et al.Survey of Stellar Atmosphere Parameter Estimation [J]. Astronomical Research & Technology,2018,15(3):257-265.

[2] 胡静静，刘静，崔双星，等.地基光电望远镜对 GEO 空间碎片探测能力分析[J].天文研究与技术，2017，14(1)：39-44.
Hu Jingjing, Liu Jing, Cui Shuangxing,et al.Analysis of Detected Ability for Ground-Based Electro-Optic Telescope to GEO Region[J].Astronomical Research & Technology,2017, 14(1): 39-44.

[3] 杜俊举.空间碎片的测光观测与图像处理[D].山东：山东大学，2015：2-11.
Du Junju.Photometric Observation and Image Processing of Space Debris [D]. SHANDONG UNIVERSITY,2015:2-11.

[4] 胡波.高美古观测站大气消光系数测定的初步结果[J].天文学报,2010,51(4)：422-431.
Hu Bo. Preliminary results of the measurement of atmospheric extinction coefficient a Gaomeigu Observing Station [J]. Acta Astronomica Sinica,2010,51(4):422-431.

[5] 张周生，陈培生，周吉光.丽江高美古的大气消光系数测定[J].云南天文台台刊，1996，S1：97-102.

ChinaXiv合作期刊

Zhang Zhousheng, Chen Peisheng, Zhou Jiguang. Determination of the Extinction Coefficient at Gaomeigu [J]. Publications of the Yunnan Observatory, 1996,S1: 97-102.

[6] 钱伯辰，陶隽，潘红鉴. 1.56m 望远镜 CCD 照相机系统的消光系数和转换系数测定[J].上海天文台年刊，1997，18：190-195. Qian Bochen, Tao Jun, Pan Hongjian. The determination of extinction and transformation coefficients fro CCD camera system of 1.56m telescope [J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1997, 18: 190-195

[7] LIM B,SUNG H,BESSELL M S,KARIMOV R,et al.CCD Photometry of the Standard Stars atMaidanak Astronomical Observatory in Uzbekstan: Transformation and Comparisons [J]. Korea Astron Soc [J],2009,41(6):1-12.

[8] 石火明，乔琪源，胡景耀，等.兴隆 60cm 望远镜主焦 CCD 系统测光性能的研究[J].天体物理学报，1998，18(1)：99-105. Shi Huoming, Qiao Qiyuan, Hu Jingyao,et al.Characterization of the CCD System at the BAO 60cm Reflector for Photometry[J]. Acta Astrophysica Sinica, 1998, 18(1):99-105.

[9] 邵红会.基于 UCAC2 星表的索引数据库的设计与实现[D].山东：山东大学，2010：7-16.

Shao Honghui.The Design And Implementation Of Indexed Database Based On UCAC2 Catalog[D].SHANDONG UNIVERSITY, 2010: 7-16.

[10] 郑伟康，裘予雷，王竞，等.兴隆 80cmTNT 望远镜测光性能的研究[J].天文研究与技术——国家天文台台刊，2009,6(2)：136-141.

Zheng WeiKang, Qiu Yulei,Wang Jing, et al. Photometric accuracy of the Xinglong 80cm Tsinghuo-NOAC Telescope (TNT) [J]. Astronomical Research &Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China,2009,6(2):136-141.

Study on the photometric accuracy evaluation of 280 mm rotatable photoelectric array in Jilin astronomical observation base

Niu BingLi[1,2], Liu ChengZhi[1], Li ZhenWei[1], KangZhe[1]

(1.Changchun satellite observation station,National Astronomical Observatory,Chinese Academy of Sciences,Changchun 130022, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper,the photometric accuracies of 280mm whole sky area rotatable photoelectric array which sited in Jilin astronomical observation are studied.A set of photometric standard stars of M67 open star cluster are observed.Firstly, we prepocess the image in IRAF and the photometry data is acquired by using the method of differential photometry.Then, the data is extracted for least square linear fitting, the fitting results show the main extinction coefficient and the transformation equations from instrument magnitude to standard magnitude.Finally, the root mean square error between transformed magnitude and standard magnitude is calculated to evaluate the photometric accuracy of the equipment.Our results indicate that the photometric precisions of this equipment is 0.13 mag for objects brighter than 13.8 mag under photometric conditions.In order to check this result we match the image with UCAC2 star catalogue and

chinaXiv:202106.00099v1

ChinaXiv合作期刊

calculated the photometric accuracy.The results basically similar ot the former.The photometry accuracy of this equipment can basically meet the requirements of space debris observation.

Key words: photometry precision; sky survey; standard star; transformation equations;UCAC2 star catalogue

chinaXiv:202106.00099v1